下载APP

04 | 内存友好的数据结构该如何细化设计？

2021-08-03 蒋德钧

《Redis源码剖析与实战》 课程介绍 >

讲述：蒋德钧
时长 21:56 大小 20.09M

你好，我是蒋德钧。今天我们来聊聊，Redis 中是如何通过优化设计数据结构，来提升内存利用率的。

我们知道 Redis 是内存数据库，所以，高效使用内存对 Redis 的实现来说非常重要。而实际上，Redis 主要是通过两大方面的技术来提升内存使用效率的，分别是**数据结构的优化设计与使用**，以及**内存数据按一定规则淘汰**。

关于内存数据按规则淘汰，这是通过 Redis 内存替换策略实现的，也就是将很少使用的数据从内存中淘汰，从而把有限的内存空间用于保存会被频繁访问的数据。这部分的设计实现，主要和内存替换策略有关，我会在后面的缓存模块给你详细介绍。

所以这节课，我主要是带你学习 Redis 数据结构在面向内存使用效率方面的优化，其中包括两方面的设计思路：一是**内存友好的数据结构设计**；二是**内存友好的数据使用方式**。

这两方面的设计思路和实现方法是具有通用性的，当你在设计系统软件时，如果需要对内存使用精打细算，以便节省内存开销，这两种设计方法和实现考虑就非常值得学习和掌握。

好，接下来，我们就先来学习下内存友好的数据结构设计。

内存友好的数据结构

首先要知道，在 Redis 中，有三种数据结构针对内存使用效率做了设计优化，分别是简单动态字符串（SDS）、压缩列表（ziplist）和整数集合（intset）。下面，我们就分别来学习一下。

SDS 的内存友好设计

实际上，我在第 2 讲中就已经给你介绍过 SDS 的结构设计，这里我们先做个简单的回顾：SDS 设计了不同类型的结构头，包括 sdshdr8、sdshdr16、sdshdr32 和 sdshdr64。这些不同类型的结构头可以适配不同大小的字符串，从而避免了内存浪费。

不过，SDS 除了使用精巧设计的结构头外，在保存较小字符串时，其实还使用了**嵌入式字符串**的设计方法。这种方法避免了给字符串分配额外的空间，而是可以让字符串直接保存在 Redis 的基本数据对象结构体中。

所以这也就是说，要想理解嵌入式字符串的设计与实现，我们就需要先来了解下，Redis 使用的基本数据对象结构体 redisObject 是什么样的。

redisObject 结构体与位域定义方法

redisObject 结构体是在 server.h 文件中定义的，主要功能是用来保存键值对中的值。这个结构一共定义了 4 个元数据和一个指针。

type：redisObject 的数据类型，是应用程序在 Redis 中保存的数据类型，包括 String、List、Hash 等。

encoding：redisObject 的编码类型，是 Redis 内部实现各种数据类型所用的数据结构。

lru：redisObject 的 LRU 时间。

refcount：redisObject 的引用计数。

ptr：指向值的指针。

下面的代码展示了 redisObject 结构体的定义：

复制代码

```
typedef struct redisObject {
    unsigned type:4; //redisObject的数据类型，4个bits
    unsigned encoding:4; //redisObject的编码类型，4个bits
    unsigned lru:LRU_BITS;  //redisObject的LRU时间，LRU_BITS为24个bits
    int refcount; //redisObject的引用计数，4个字节
    void *ptr; //指向值的指针，8个字节
} robj;
```

从代码中我们可以看到，在 type、encoding 和 lru 三个变量后面都有一个冒号，并紧跟着一个数值，表示该元数据占用的比特数。其中，type 和 encoding 分别占 4bits。而 lru 占用的比特数，是由 server.h 中的宏定义 LRU_BITS 决定的，它的默认值是 24bits，如下所示：

复制代码

```
#define LRU_BITS 24
```

而这里我想让你学习掌握的，就是这种**变量后使用冒号和数值的定义方法**。这实际上是 C 语言中的**位域定义方法**，可以用来有效地节省内存开销。

这种方法比较适用的场景是，当一个变量占用不了一个数据类型的所有 bits 时，就可以使用位域定义方法，把一个数据类型中的 bits，划分成多个位域，每个位域占一定的 bit 数。这样一来，一个数据类型的所有 bits 就可以定义多个变量了，从而也就有效节省了内存开销。

此外，你可能还会发现，对于 type、encoding 和 lru 三个变量来说，它们的数据类型都是 unsigned。已知一个 unsigned 类型是 4 字节，但这三个变量，是分别占用了一个 unsigned 类型 4 字节中的 4bits、4bits 和 24bits。因此，相较于三个变量，每个变量用一个 4 字节的 unsigned 类型定义来说，使用位域定义方法可以让三个变量只用 4 字节，最后就能节省 8 字节的开销。

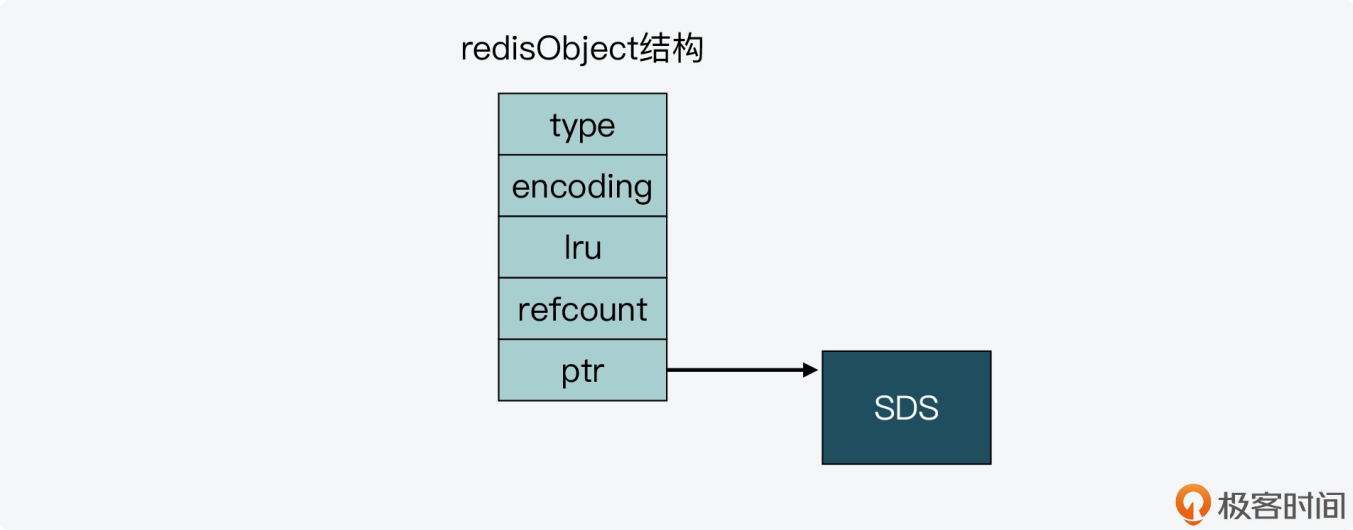
所以，当你在设计开发内存敏感型的软件时，就可以把这种位域定义方法使用起来。

好，了解了 redisObject 结构体和它使用的位域定义方法以后，我们再来看嵌入式字符串是如何实现的。

嵌入式字符串

前面我说过，SDS 在保存比较小的字符串时，会使用嵌入式字符串的设计方法，将字符串直接保存在 redisObject 结构体中。然后在 redisObject 结构体中，存在一个指向值的指针 ptr，而一般来说，这个 ptr 指针会指向值的数据结构。

这里我们就以创建一个 String 类型的值为例，Redis 会调用 **createStringObject 函数**，来创建相应的 redisObject，而这个 redisObject 中的 ptr 指针，就会指向 SDS 数据结构，如下图所示。



在 Redis 源码中，createStringObject 函数会根据要创建的字符串的长度，决定具体调用哪个函数来完成创建。

那么针对这个 createStringObject 函数来说，它的参数是**字符串 ptr** 和**字符串长度 len**。当 len 的长度大于 OBJ_ENCODING_EMBSTR_SIZE_LIMIT 这个宏定义时，createStringObject 函数会调用 createRawStringObject 函数，否则就调用 createEmbeddedStringObject 函数。而在我们分析的 Redis 5.0.8 源码版本中，这个 OBJ_ENCODING_EMBSTR_SIZE_LIMIT 默认定义为 44 字节。

这部分代码如下所示：

复制代码

```
#define OBJ_ENCODING_EMBSTR_SIZE_LIMIT 44
robj *createStringObject(const char *ptr, size_t len) {
    //创建嵌入式字符串，字符串长度小于等于44字节
    if (len <= OBJ_ENCODING_EMBSTR_SIZE_LIMIT)
        return createEmbeddedStringObject(ptr,len);
    //创建普通字符串，字符串长度大于44字节
    else
        return createRawStringObject(ptr,len);
}
```

现在，我们就来分析一下 createStringObject 函数的源码实现，以此了解大于 44 字节的普通字符串和小于等于 44 字节的嵌入式字符串分别是如何创建的。

首先，对于 **createRawStringObject 函数**来说，它在创建 String 类型的值的时候，会调用 createObject 函数。

> 补充：createObject 函数主要是用来创建 Redis 的数据对象的。因为 Redis 的数据对象有很多类型，比如 String、List、Hash 等，所以在 createObject 函数的两个参数中，有一个就是用来表示所要创建的数据对象类型，而另一个是指向数据对象的指针。

然后，createRawStringObject 函数在调用 createObject 函数时，会传递 OBJ_STRING 类型，表示要创建 String 类型的对象，以及传递指向 SDS 结构的指针，如以下代码所示。这里**需要注意**的是，指向 SDS 结构的指针是由 sdsnewlen 函数返回的，而 sdsnewlen 函数正是用来创建 SDS 结构的。

复制代码

```
robj *createRawStringObject(const char *ptr, size_t len) {
    return createObject(OBJ_STRING, sdsnewlen(ptr,len));
```

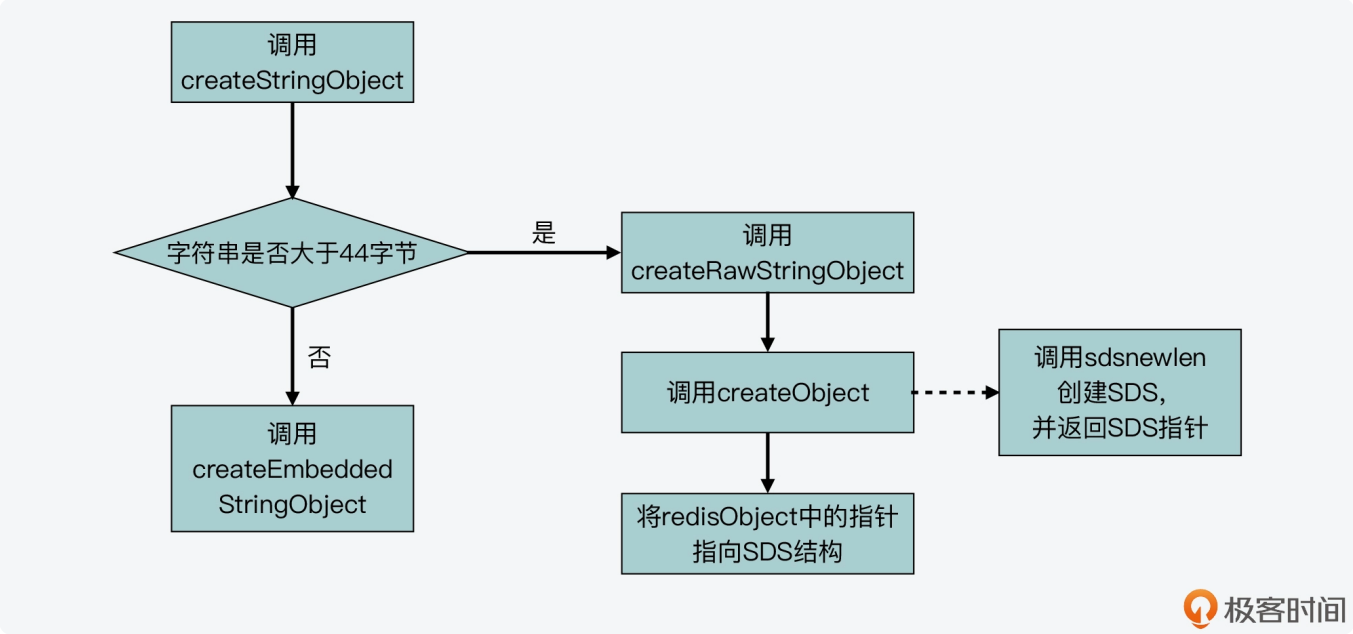
```
3 }
```

最后，我们再来进一步看下 **createObject 函数**。这个函数会把参数中传入的、指向 SDS 结构体的指针直接赋值给 redisObject 中的 ptr，这部分的代码如下所示：

复制代码

```
robj *createObject(int type, void *ptr) {
    //给redisObject结构体分配空间
    robj *o = zmalloc(sizeof(*o));
    //设置redisObject的类型
    o->type = type;
    //设置redisObject的编码类型，此处是OBJ_ENCODING_RAW，表示常规的SDS
    o->encoding = OBJ_ENCODING_RAW;
    //直接将传入的指针赋值给redisObject中的指针。
    o->ptr = ptr;
    o->refcount = 1;
    …
    return o;
}
```

为了方便理解普通字符串创建方法，我画了一张图，你可以看下。



这也就是说，在创建普通字符串时，Redis 需要分别给 redisObject 和 SDS 分别分配一次内存，这样就既带来了内存分配开销，同时也会导致内存碎片。因此，当字符串小于等于 44 字节时，Redis 就使用了嵌入式字符串的创建方法，以此减少内存分配和内存碎片。

而这个创建方法，就是由我们前面提到的 **createEmbeddedStringObject 函数**来完成的，该函数会使用一块连续的内存空间，来同时保存 redisObject 和 SDS 结构。这样一来，内存分配只有一次，而且也避免了内存碎片。

createEmbeddedStringObject 函数的原型定义如下，它的参数就是从 createStringObject 函数参数中获得的字符串指针 ptr，以及字符串长度 len。

```
robj *createEmbeddedStringObject(const char *ptr, size_t len)
```

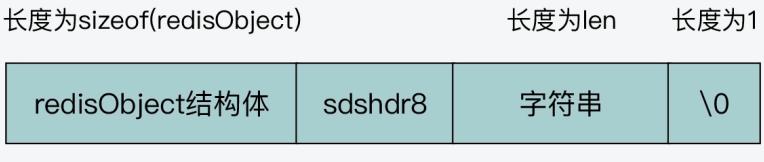
那么下面，我们就来具体看看，createEmbeddedStringObject 函数是如何把 redisObject 和 SDS 放置在一起的。

首先，createEmbeddedStringObject 函数会**分配一块连续的内存空间**，这块内存空间的大小等于 redisObject 结构体的大小、SDS 结构头 sdshdr8 的大小和字符串大小的总和，并且再加上 1 字节。注意，这里最后的 1 字节是 SDS 中加在字符串最后的结束字符“\0”。

这块连续内存空间的分配情况如以下代码所示：

```
robj *o = zmalloc(sizeof(robj)+sizeof(struct sdshdr8)+len+1);
```

你也可以参考下图，其中展示了这块内存空间的布局。



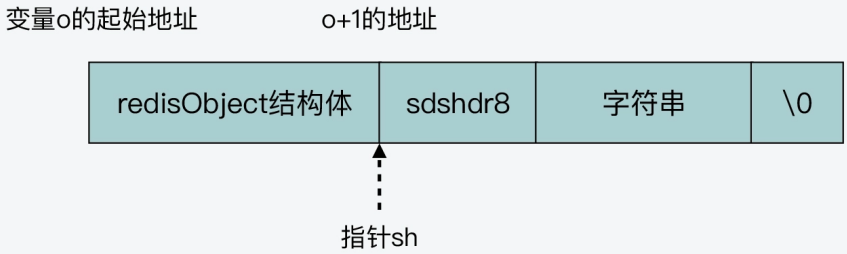
好，那么 createEmbeddedStringObject 函数在分配了内存空间之后，就会**创建 SDS 结构的指针 sh，并把 sh 指向这块连续空间中 SDS 结构头所在的位置**，下面的代码显示了这

步操作。其中，o 是 redisObject 结构体的变量，o+1 表示将内存地址从变量 o 开始移动一段距离，而移动的距离等于 redisObject 这个结构体的大小。

```
1 struct sdshdr8 *sh = (void*)(o+1);
```

复制代码

经过这步操作后，sh 指向的位置就如下图所示：



极客时间

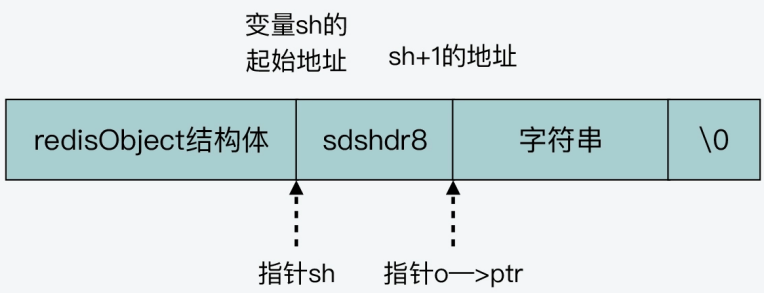
紧接着，createEmbeddedStringObject 函数会**把 redisObject 中的指针 ptr，指向 SDS 结构中的字符数组。**

如以下代码所示，其中 sh 是刚才介绍的指向 SDS 结构的指针，属于 sdshdr8 类型。而 sh+1 表示把内存地址从 sh 起始地址开始移动一定的大小，移动的距离等于 sdshdr8 结构体的大小。

```
1 o->ptr = sh+1;
```

复制代码

这步操作完成后，redisObject 结构体中的指针 ptr 的指向位置就如下图所示，它会指向 SDS 结构头的末尾，同时也是字符数组的起始位置：



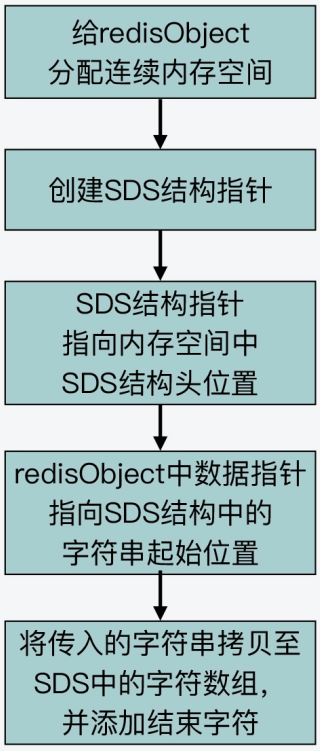
极客时间

最后，createEmbeddedStringObject 函数会**把参数中传入的指针 ptr 指向的字符串，拷贝到 SDS 结构体中的字符数组，并在数组最后添加结束字符**。这部分代码如下所示：

```
1 memcpy(sh->buf,ptr,len);
2 sh->buf[len] = '\0';
```

复制代码

下面这张图，也展示了 createEmbeddedStringObject 创建嵌入式字符串的过程，你可以再整体来看看。



总之，你可以记住，Redis 会通过设计实现一块连续的内存空间，把 redisObject 结构体和 SDS 结构体紧凑地放置在一起。这样一来，对于不超过 44 字节的字符串来说，就可以避免内存碎片和两次内存分配的开销了。

而除了嵌入式字符串之外，Redis 还设计了压缩列表和整数集合，这也是两种紧凑型的内存数据结构，所以下面我们再来学习下它们的设计思路。

压缩列表和整数集合的设计

首先你要知道，List、Hash 和 Sorted Set 这三种数据类型，都可以使用压缩列表（ziplist）来保存数据。压缩列表的函数定义和实现代码分别在 ziplist.h 和 ziplist.c 中。

不过，我们在 ziplist.h 文件中其实根本看不到压缩列表的结构体定义。这是因为压缩列表本身就是一块连续的内存空间，它通过使用不同的编码来保存数据。

这里为了方便理解压缩列表的设计与实现，我们先来看看它的**创建函数 ziplistNew**，如下所示：

复制代码

```
unsigned char *ziplistNew(void) {
    //初始分配的大小
    unsigned int bytes = ZIPLIST_HEADER_SIZE+ZIPLIST_END_SIZE;
    unsigned char *zl = zmalloc(bytes);
    …
   //将列表尾设置为ZIP_END
    zl[bytes-1] = ZIP_END;
    return zl;
}
```

实际上，ziplistNew 函数的逻辑很简单，就是创建一块连续的内存空间，大小为 ZIPLIST_HEADER_SIZE 和 ZIPLIST_END_SIZE 的总和，然后再把该连续空间的最后一个字节赋值为 ZIP_END，表示列表结束。

另外你要注意的是，在上面代码中定义的三个宏 ZIPLIST_HEADER_SIZE、ZIPLIST_END_SIZE 和 ZIP_END，在 ziplist.c 中也分别有定义，分别表示 ziplist 的列表头大小、列表尾大小和列表尾字节内容，如下所示。

复制代码

```
//ziplist的列表头大小，包括2个32 bits整数和1个16bits整数，分别表示压缩列表的总字节数，列表
#define ZIPLIST_HEADER_SIZE     (sizeof(uint32_t)*2+sizeof(uint16_t))
//ziplist的列表尾大小，包括1个8 bits整数，表示列表结束。
#define ZIPLIST_END_SIZE        (sizeof(uint8_t))
//ziplist的列表尾字节内容
#define ZIP_END 255
```

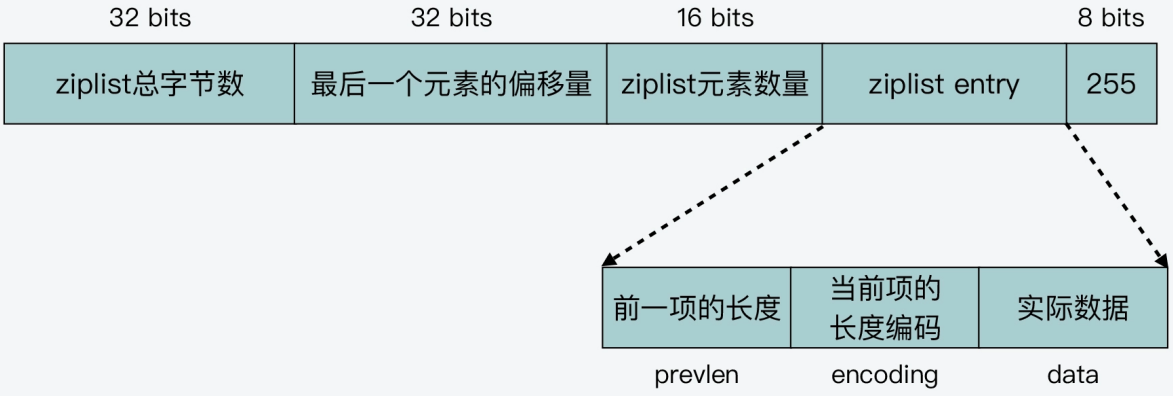
那么，在创建一个新的 ziplist 后，该列表的内存布局就如下图所示。注意，此时列表中还没有实际的数据。

极客时间

然后，当我们往 ziplist 中插入数据时，ziplist 就会根据数据是字符串还是整数，以及它们的大小进行不同的编码。这种根据数据大小进行相应编码的设计思想，正是 Redis 为了节省内存而采用的。

那么，ziplist 是如何进行编码呢？要学习编码的实现，我们要先了解 ziplist 中列表项的结构。

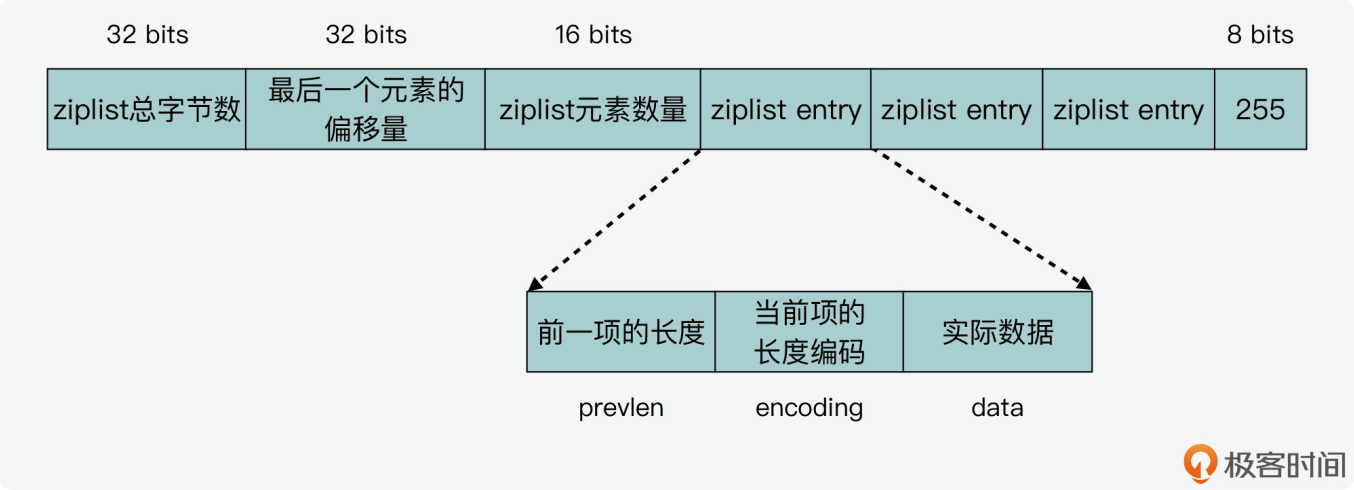
ziplist 列表项包括三部分内容，分别是**前一项的长度（prevlen）**、**当前项长度信息的编码结果（encoding）**，以及**当前项的实际数据（data）**。下面的图展示了列表项的结构（图中除列表项之外的内容分别是 ziplist 内存空间的起始和尾部）。



极客时间

实际上，所谓的编码技术，就是指**用不同数量的字节来表示保存的信息**。在 ziplist 中，编码技术主要应用在列表项中的 prevlen 和 encoding 这两个元数据上。而当前项的实际数据 data，则正常用整数或是字符串来表示。

所以这里，我们就先来看下 **prevlen 的编码设计**。ziplist 中会包含多个列表项，每个列表项都是紧挨着彼此存放的，如下图所示。



而为了方便查找，每个列表项中都会记录前一项的长度。因为每个列表项的长度不一样，所以如果使用相同的字节大小来记录 prevlen，就会造成内存空间浪费。

我给你举个例子，假设我们统一使用 4 字节记录 prevlen，如果前一个列表项只是一个字符串“redis”，长度为 5 个字节，那么我们用 1 个字节（8 bits）就能表示 256 字节长度（2 的 8 次方等于 256）的字符串了。此时，prevlen 用 4 字节记录，其中就有 3 字节是浪费掉了。

好，我们再回过头来看，ziplist 在对 prevlen 编码时，会先调用 **zipStorePrevEntryLength 函数**，用于判断前一个列表项是否小于 254 字节。如果是的话，那么 prevlen 就使用 1 字节表示；否则，zipStorePrevEntryLength 函数就调用 zipStorePrevEntryLengthLarge 函数进一步编码。这部分代码如下所示：

复制代码

```
//判断prevlen的长度是否小于ZIP_BIG_PREVLEN，ZIP_BIG_PREVLEN等于254
if (len < ZIP_BIG_PREVLEN) {
    //如果小于254字节，那么返回prevlen为1字节
    p[0] = len;
    return 1;
} else {
    //否则，调用zipStorePrevEntryLengthLarge进行编码
    return zipStorePrevEntryLengthLarge(p,len);
}
```

也就是说，**zipStorePrevEntryLengthLarge 函数**会先将 prevlen 的第 1 字节设置为 254，然后使用内存拷贝函数 memcpy，将前一个列表项的长度值拷贝至 prevlen 的第 2

至第 5 字节。最后，zipStorePrevEntryLengthLarge 函数返回 prevlen 的大小，为 5 字节。

复制代码

```
if (p != NULL) {
    //将prevlen的第1字节设置为ZIP_BIG_PREVLEN，即254
    p[0] = ZIP_BIG_PREVLEN;
  //将前一个列表项的长度值拷贝至prevlen的第2至第5字节，其中sizeof(len)的值为4
    memcpy(p+1,&len,sizeof(len));
    …
}
//返回prevlen的大小，为5字节
return 1+sizeof(len);
```

好，在了解了 prevlen 使用 1 字节和 5 字节两种编码方式后，我们再来学习下 **encoding 的编码方法**。

我们知道，一个列表项的实际数据，既可以是整数也可以是字符串。整数可以是 16、32、64 等字节长度，同时字符串的长度也可以大小不一。

所以，ziplist 在 zipStoreEntryEncoding 函数中，针对整数和字符串，就分别使用了不同字节长度的编码结果。下面的代码展示了 zipStoreEntryEncoding 函数的部分代码，你可以看到当数据是不同长度字符串或是整数时，编码结果的长度 len 大小不同。

复制代码

```
//默认编码结果是1字节
  unsigned char len = 1;
  //如果是字符串数据
  if (ZIP_IS_STR(encoding)) {
      //字符串长度小于等于63字节（16进制为0x3f）
        if (rawlen <= 0x3f) {
            //默认编码结果是1字节
            …
        }
    //字符串长度小于等于16383字节（16进制为0x3fff）
        else if (rawlen <= 0x3fff) {
            //编码结果是2字节
            len += 1;
            …
        }
    //字符串长度大于16383字节

```

```
        else {
            //编码结果是5字节
            len += 4;
            …
        }
    } else {
        /* 如果数据是整数，编码结果是1字节*/
        if (!p) return len;
        ...
    }
```

简而言之，针对不同长度的数据，使用不同大小的元数据信息（prevlen 和 encoding），这种方法可以有效地节省内存开销。当然，除了 ziplist 之外，Redis 还设计了一个内存友好的数据结构，这就是**整数集合（intset）**，它是作为底层结构来实现 Set 数据类型的。

和 SDS 嵌入式字符串、ziplist 类似，整数集合也是一块连续的内存空间，这一点我们从整数集合的定义中就可以看到。intset.h 和 intset.c 分别包括了整数集合的定义和实现。

下面的代码展示了 intset 的结构定义。我们可以看到，整数集合结构体中记录数据的部分，就是一个 int8_t 类型的整数数组 contents。从内存使用的角度来看，整数数组就是一块连续内存空间，所以这样就避免了内存碎片，并提升了内存使用效率。

复制代码

```
typedef struct intset {
    uint32_t encoding;
    uint32_t length;
    int8_t contents[];
} intset;
```

好了，到这里，我们就已经了解了 Redis 针对内存开销所做的数据结构优化，分别是 SDS 嵌入式字符串、压缩列表和整数集合。

而除了对数据结构做优化，Redis 在数据访问上，也会尽量节省内存开销，接下来我们就一起来学习下。

节省内存的数据访问

我们知道，在 Redis 实例运行时，有些数据是会被经常访问的，比如常见的整数，Redis 协议中常见的回复信息，包括操作成功（“OK”字符串）、操作失败（ERR），以及常见

的报错信息。

所以，为了避免在内存中反复创建这些经常被访问的数据，Redis 就采用了**共享对象**的设计思想。这个设计思想很简单，就是把这些常用数据创建为共享对象，当上层应用需要访问它们时，直接读取就行。

现在我们就来做个假设。有 1000 个客户端，都要保存“3”这个整数。如果 Redis 为每个客户端，都创建了一个值为 3 的 redisObject，那么内存中就会有大量的冗余。而使用了共享对象方法后，Redis 在内存中只用保存一个 3 的 redisObject 就行，这样就有效节省了内存空间。

以下代码展示的是 server.c 文件中，**创建共享对象的函数 createSharedObjects**，你可以看下。

复制代码

```
void createSharedObjects(void) {
    …
    //常见回复信息
    shared.ok = createObject(OBJ_STRING,sdsnew("+OK\r\n"));
    shared.err = createObject(OBJ_STRING,sdsnew("-ERR\r\n"));
    …
    //常见报错信息
  shared.nokeyerr = createObject(OBJ_STRING,sdsnew("-ERR no such key\r\n"));
  shared.syntaxerr = createObject(OBJ_STRING,sdsnew("-ERR syntax error\r\n"));
    //0到9999的整数
    for (j = 0; j < OBJ_SHARED_INTEGERS; j++) {
         shared.integers[j] =
           makeObjectShared(createObject(OBJ_STRING,(void*)(long)j));
         …
     }
    …
}
```

小结

降低内存开销，对于 Redis 这样的内存数据库来说非常重要。今天这节课，我们了解了 Redis 用于优化内存使用效率的两种方法：内存优化的数据结构设计和节省内存的共享数据访问。

那么，对于实现数据结构来说，如果想要节省内存，Redis 就给我们提供了两个优秀的设计思想：一个是**使用连续的内存空间**，避免内存碎片开销；二个是**针对不同长度的数据，采用不同大小的元数据**，以避免使用统一大小的元数据，造成内存空间的浪费。

另外在数据访问方面，你也要知道，**使用共享对象**其实可以避免重复创建冗余的数据，从而也可以有效地节省内存空间。不过，共享对象主要适用于**只读场景**，如果一个字符串被反复地修改，就无法被多个请求共享访问了。所以这一点，你在应用时也需要注意一下。

每课一问

SDS 判断是否使用嵌入式字符串的条件是 44 字节，你知道为什么是 44 字节吗？

欢迎在留言区分享你的思考过程，我们一起交流讨论。如果觉得有收获，也欢迎你把今天的内容分享给更多的朋友。

分享给需要的人，Ta订阅后你可得 20 元现金奖励

赞 2 提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 03 | 如何实现一个性能优异的Hash表？

下一篇 05 | 有序集合为何能同时支持点查询和范围查询？

精选留言 (8)

写留言

Kaito

2021-08-03

1、要想理解 Redis 数据类型的设计，必须要先了解 redisObject。

Redis 的 key 是 String 类型，但 value 可以是很多类型（String/List/Hash/Set/ZSet 等），所以 Redis 要想存储多种数据类型，就要设计一个通用的对象进行封装，这个对象就是 redisObject。...

展开

7 22

Darren 神

2021-08-03

Kaito大佬描述的已经很详细了，44是因为 N = 64 - 16(redisObject) - 3(sdshr8) - 1 (\0)， N = 44 字节。那么为什么是64减呢，为什么不是别的，因为在目前的x86体系下，一般的缓存行大小是64字节，redis为了一次能加载完成，因此采用64自己作为embstr类型(保存redisObject)的最大长度。

展开

7

曾轼麟

2021-08-03

先回答老师的问题：为什么嵌入式字符串是以44字节为边界？

在了解这个问题之前，我们来了解一下jemalloc 分配内存机制，jemalloc 为了减少分配的内存空间大小不是2的幂次，在每次分配内存的时候都会返回2的幂次的空间大小，比如我需要分配5字节空间，jemalloc 会返回8字节，15字节会返回16字节。其常见的分配空间...

展开

5

可怜大灰狼

2021-08-03

原先embstr的限制长度是39，现在提升到了44，还是归功于sdshdr变成sdshdr8，头减少了5字节。
注释：The current limit of 44 is chosen so that the biggest string object. we allocate as EMBSTR will still fit into the 64 byte arena of jemalloc.

展开

1 2

lzh2nix

2021-08-07

内存友好可以从以下三个方面考虑：

1. 内存碎片的优化。redis作为内存大户使用了对内存碎片更友好内存分配器(jemalloc)

2. 内部数据结构对内存做很多的特殊优化...

展开

悟空聊架构
2021-08-06

这篇确实难度有增加，涉及到了内存分配，而且对于 C 语言的功底也是有要求的。

课后题，44 怎么来的，objet.c 文件中有定义：
* The current limit of 44 is chosen so that the biggest string object
* we allocate as EMBSTR will still fit into the 64 byte arena of jemalloc. */...
展开

阿梵杰~
2021-08-04

而 sh+1 表示把内存地址从 sh 起始地址开始移动一定的大小，移动的距离等于 sdshdr8 结构体的大小。

o->ptr = sh+1;
...
展开

2

董宗磊
2021-08-04

这个专栏的难度感觉有点高了，有些对着代码也看不太懂，更不要说能记住了。老师有什么好的学习思路建议吗？